УДК 620.179.16:620.165.29

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПОМОЩЬЮ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

И.О. Болотина, Г.С. Евтушенко, А.И. Солдатов, С.А. Цехановский

*Предлагается метод обработки сигналов преобразователей фазированной антенной решётки и на его основе устройство для определения координат источников сигналов акустической эмиссии. Сигналы акустической эмиссии принимаются преобразователями, представляющими собой две ортогонально ориентированные линейные фазированные антенные решётки. Выходная информация формируется перемножением двух сигналов, каждый из которых образуется как сумма произведений сигналов преобразователей каждой антенной решётки, а местоположение источника акустической эмиссии определяют по визуализируемому двумерному изображению акустического поля зоны контроля.*

## Введение

В последнее время возрастает интерес к системам обнаружения подводных источников акустической эмиссии (АЭ). К таким источникам относят: дефекты подводных переходов трубопроводов; шумы различных объектов; сигналы, излучаемые в воде фауной и др.

При визуализации подводных объектов необходимо в минимально короткий срок обнаружить источник АЭ и с высокой степенью точности определить его координаты. Для этого необходимо преобразовывать информацию в реальном масштабе времени и оперативно интерпретировать полученную картину.

## Метод определения положения подводных источников АЭ

Существенным дополнением к разработанной ранее аппаратуре [1, 2] может стать система обнаружения источников сигналов АЭ с обработкой информации в реальном масштабе времени и отображением её на дисплее ПЭВМ. Применение визуализации волнового поля дает возможность "осматривать" подводное пространство с помощью ультразвуковых колебаний. С этой целью используется пьезоэлектрическая матрица, позволяющая сканировать волновое поле по заданному закону. Наиболее целесообразным представляется выполнение матрицы в виде двух линейных ортогонально ориентированных фазированных антенных решёток (ФАР) (рис. 1).

Диаграмма направленности (ДН) каждой из них должна быть широкой в одном направлении и более узкой в другом. Каждая линейная ФАР обеспечивает секторное сканирование в продольной плоскости относительно апертуры ФАР. Перемножение ДН обеспечивает сканирование по площади.

Нами [3] был предложен новый метод обработки парциальных сигналов преобразователей ФАР, сутью которого является их перемножение и последующее сложение. К его достоинству следует отнести простоту аппаратурной реализации и возможность получения узкой ДН. Абсолютно правомерно такое решение в случае применения ФАР для регистрации сигналов АЭ, когда требуется только приёмник акустического излучения с максимально возможным пространственным разрешением.

## Структурная схема устройства

Для реализации указанного выше метода обработки сигналов преобразователей ФАР было разработано устройство, структурная схема которого приведена на рис. 2. Покажем работу этого устройства на примере блока - 1 горизонтального канала, поскольку остальные блоки горизонтального и вертикального каналов работают аналогичным образом. Сигналы АЭ принимаются парой преобразователей горизонтальной линейной ФАР (например, -1 и 1, -2 и 2 и т.д.), далее в приёмно-усилительном тракте они усиливаются и поступают на соответствующие входы смесителей. На другие входы смесителей поступают сигналы гетеродинов.

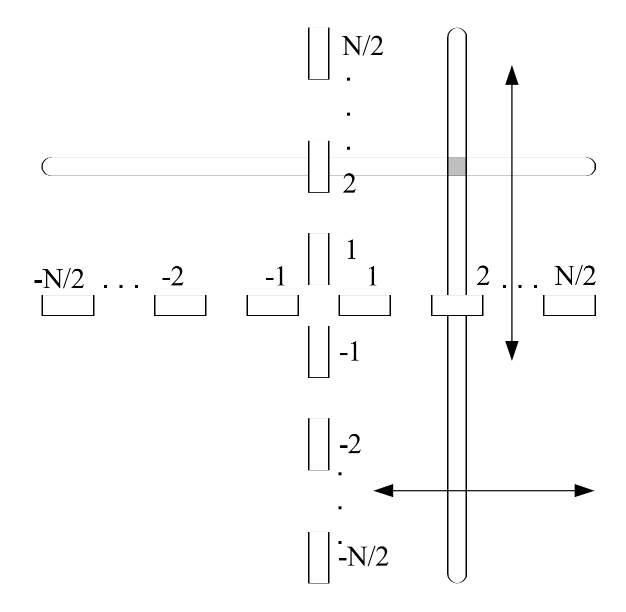



**Рис. 1.** *Конфигурация двумерной антенной решётки, где N = 2, 4, 6 ... - количество преобразователей в линейной ФАР*

В каждый момент времени на выходах гетеродинов устанавливается такое соотношение фаз сигналов, которое необходимо для секторного сканирования линейной ФАР. Сигналы промежуточной частоты, получившие необходимые фазовые задержки, усиливаются усилителем промежуточной частоты (УПЧ) и поступают на умножитель (X). После фильтра нижних частот (ФНЧ) сигналы с блоков - 1, 2 ... $N/2$ поступают на сумматор (Σ), на выходе которого формируется сигнал в соответствии с выражением

$$U(\Delta\Theta) = A \cdot \sum_{i=2}^{\frac{N}{2}} R_{-i}(\alpha) \cdot R_i(\alpha) \cdot \cos(\Delta\Theta_{-ii}), \quad (1)$$

где $A$ - амплитудный коэффициент; $R_{-i}(\alpha), R_i(\alpha)$ - ДН $i$-го элементарного преобразователя линейной ФАР, расположенного слева и справа от начала координат (см. рис. 1); $\Delta\Theta_{-ii}$ - разность фаз сигналов-$i$ и $i$-го преобразователей линейной ФАР.

В результате перемножения сигналов, сформированных в соответствии с приведённым выше выражением в трактах горизонтальной и вертикальной апертуры, образуется двумерная приёмная апертура. Воспроизведение её на дисплее ПЭВМ визуализирует поле источника сигналов АЭ в декартовой системе координат, начальная точка которой совпадает с серединой антенной системы.

Связь между управляющим контроллером устройства и ПЭВМ осуществляется через стандартный последовательный порт RS-232C. Управляющая программа написана в пакете Delphi. Для организации работы с последовательным портом использована библиотека TCOMM_32. Для отображения графики использован стандартный компонент Chart. Работа начинается после того как включена установка, и на персональном компьютере загружена управляющая программа. Нажатием на кнопку "Сброс" в контроллер посылается соответствующая команда, контроллер выполняет начальную инициализацию программы и посылает в ПЭВМ сообщение, что сброс прошел. Этим достигается следующее: производится проверка функционирования канала связи, контроллера, адекватности восприятия им команд, поступающих с ПЭВМ и готовности системы к работе.

Программа, загруженная в ПЭВМ, может вводить информацию в двух режимах:

- одиночного кадра - посредством нажатия на кнопку "Кадр";
- в автоматическом, после нажатия на кнопку "Старт".

Частота получения информации от 1 до 10 кадров в секунду задается в окошке, расположенном под кнопкой "Старт". Данные, полученные с устройства, представляются в объемном виде. Ис-

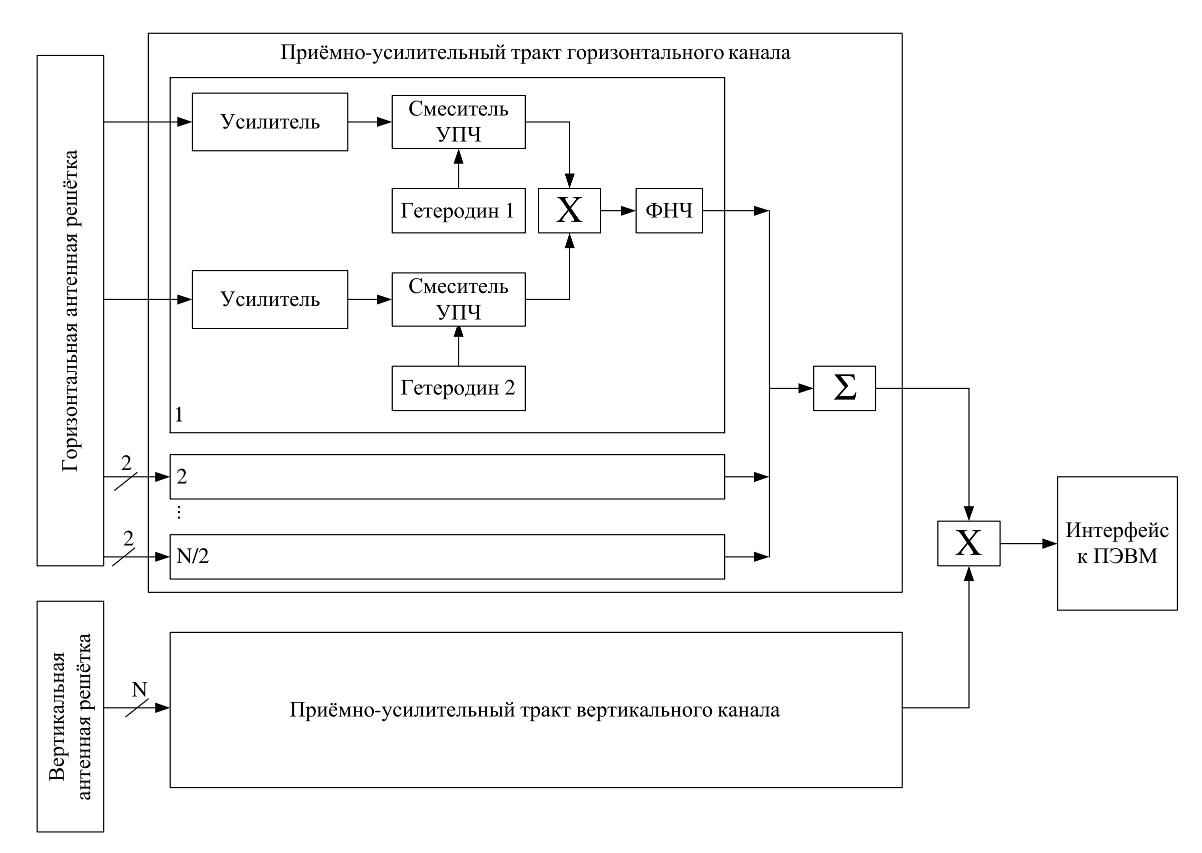



***Рис. 2.*** *Структурная схема системы визуализации источников сигналов акустической эмиссии*

пользуя управляющие ползунки "Поворот", "Вращение", "Перспектива", можно менять формат представления данных. Кроме графического представления данных, на страничке "Данные" они представлены в текстовом виде, их можно скопировать и посредством Clipboard переместить в любую другую программу. В окне "Таблица" данные представлены в табличной форме.

Площадь визуализации является площадью единовременного обзора в реальном масштабе времени и определяется углом сектора сканирования и расстоянием до поверхности изделия.

Точность фиксации положения источника сигналов АЭ на дисплее ПЭВМ определяется разрешающей способностью и, в конечном итоге, шириной ДН акустической системы.

### Теоретический расчёт разрешающей способности акустической системы

Проведём аналитическое исследование разрешающей способности для линейной эквидистантной ФАР [4]. Акустическое давление на оси парциального излучателя имеет вид

$$P_{\pm 0n} = A_{\pm n} \cos\left(\omega t - kL\sqrt{1+tg^2(\gamma_{\pm n})}\right),$$

где $$A_{\pm n} = \frac{k\rho c Q}{2\pi L\sqrt{1+tg^2(\gamma_{\pm n})}}$$

$n$ - номер преобразователя; $k$ - волновое число; $L$ - расстояние от плоскости антенной решётки до точки наблюдения; $\gamma_{\pm n}$- угол между радиус-вектором, соединяющим центр излучателя с точкой наблюдения, и нормалью к плоскости $n$-го излучателя; $\rho$ - плотность среды; $c$ - скорость звука в среде акустического тракта; $Q$ - амплитуда объёмной колебательной скорости излучателя.

В соответствии с выражением (1), результирующая функция будет равна медленно меняющейся компоненте следующего выражения

$$P_{\sum} = \sum_{n=1}^{N/2} P_n P_{-n}. \qquad (2)$$

Выражение для негармонической части произвольного члена ряда (2) примет вид

$$\frac{2A_{-n}A_n J_1(z_n)\cdot J_1(z_{-n})}{z_n \cdot z_{-n}} \times \\ \times\cos\left(\begin{matrix} kL\sqrt{1+tg^2(\gamma_n)} - \\ -kL\sqrt{1+tg^2(\gamma_{-n})} \end{matrix}\right), \qquad (3)$$

где $J_1(z_{\pm n})$ - функция Бесселя первого порядка $z_{\pm n}=ka\cdot\sin(\gamma_{\pm n})$; а - радиус излучателей.

После разложения в ряд Тейлора аргумента косинуса в выражении (3), получим:

$$\frac{2A_{-n}A_n J_1(z_n)\cdot J_1(z_{-n})}{z_n \cdot z_{-n}} \times \\ \times\cos\left(\frac{kL}{2}\cdot(\mathrm{tg}^2\gamma_n - \mathrm{tg}^2\gamma_{-n})\right). \qquad (4)$$

Поскольку

$$\mathrm{tg}\gamma_n = \mathrm{tg}\gamma_0 - \frac{d\cdot(|n|-0.5)}{L}$$

$$\mathrm{tg}\gamma_{-n} = \mathrm{tg}\gamma_0 + \frac{d\cdot(|n|-0.5)}{L},$$

где $\gamma_0$ - угол между радиус-вектором, соединяющим центр антенной решётки с точкой наблюдения, и нормалью ФАР; $d$ - расстояние между соседними элементами, то выражение (4) принимает вид

$$\frac{2A_{-n}A_n J_1(z_n)\cdot J_1(z_{-n})}{z_n \cdot z_{-n}} \times \\ \times\cos(2|n|kd\cdot\mathrm{tg}\gamma_0 - kd\cdot\mathrm{tg}\gamma_0).$$

Учитывая условия работы в зоне дифракции Фраунгофера, применяя тригонометрические преобразования и нормируя по максимальному значению, получаем

$$F(\gamma_0) = \frac{\sin(N\cdot kd\cdot tg\gamma_0)}{N\cdot\sin(kd\cdot tg\gamma_0)}.$$

Тогда ДН будет описываться выражением

$$D(\gamma_0) = \left(\frac{J_1(z)}{z}\right)^2 \cdot \frac{\sin(N\cdot kd\cdot\mathrm{tg}\gamma_0)}{N\cdot\sin(kd\cdot\mathrm{tg}\gamma_0)}, \qquad (5)$$

где $z = ka\cdot\sin\gamma_0$.

Отличие приведенного выше выражения для ДН от традиционного состоит в присутствии в выражении (5) отрицательных величин в районе боковых лепестков, имеющих нечётные номера. На рис. 3 показан вид такой зависимости в декартовой системе координат, нормированной по максимуму давления на оси антенной решётки, для конкретных параметров акустического тракта (длина волны $\lambda$ = 1 см, расстояние $L$ до источника сигналов АЭ составляет 1000$\lambda$ длина преобразователей $l$ выбрана равной расстояние $d$ между преобразователями - 2,7$\lambda$, количество преобразователей $N$=6); по оси абсцисс отложено значение угла между направлением луча и акустической осью, выраженное в градусах. Для сравнения на этом же рисунке

пунктиром изображена ДН антенной решётки при традиционном методе обработки парциальных сигналов.

При сравнении ДН линейных эквидистантных ФАР, полученных традиционным и предложенным методами обработки парциальных сигналов (рис. 3), можно видеть, что ширина как основного, так и боковых лепестков предлагаемой антенной системы вдвое меньше традиционной. Следовательно, её разрешающая способность выше в два раза при тех же частотных и геометрических параметрах. Интересно также отметить снижение уровня первого максимального бокового лепестка примерно на 25 %.

Предложенный метод обработки сигналов АЭ обеспечивает минимально возможную ширину ДН, поскольку при её формировании помимо амплитудных характеристик используются временные параметры в виде разности фаз сигналов отдельных преобразователей.

Достоверность регистрации положения источника АЭ в большой степени определяется формой ДН; боковые лепестки в ней должны быть по возможности минимальными. Это достигается оптимальным выбором количества элементов линейной ФАР, размерами элементов, расстоянием между соседними элементами.

### Моделирование процесса сканирования и визуализации акустического поля

Для обнаружения дефекта и определения его координат в реальном масштабе времени необходимо представить информацию, передаваемую с помощью звуковых волн, в виде зрительного образа. Расчёт разрешающей способности, основанный на критерии Рэлея [5], не учитывает эти особенности. Для их оценки было выполнено компьютерное моделирование процесса визуализации в режиме с-сканирования с представлением информации в ахроматической шкале оттенков [6].

Разность хода акустических парциальных приёмников компенсировалась введением соответствующего дополнительного сдвига фазы. Этот сдвиг фазы $\psi_n$ связан с углом отклонения главного лепестка ДН $\gamma$ от нормали к поверхности ФАР следующим выражением

$$\Psi_n = \left[2|n|-1\right]\frac{\pi d n}{\lambda |n|}\sin\gamma, \text{ (рад)}. \qquad (6)$$

Выражение (6) получено только для дальней зоны и справедливо как для горизонтальной, так и для вертикальной эквидистантной линейной ФАР. Тогда максимальный угол отклонения будет равен

$$\gamma_{\max} = \pm\frac{2\lambda}{d(2|n|-1)}.$$

Алгоритм моделирования процесса визуализации основан на вычислении двумерной нормированной апертуры для каждой точки зоны контроля. На рис. 4 источники АЭ представлены в виде световых пятен, причём яркость их связана прямо пропорциональной зависимостью с амплитудой сигнала.

Анализ изображений на рис. 4 позволяет программно или визуально оценить величину элемента разложения синтезированной апертуры. Из этого рисунка следует, что диаметр пятна составляет примерно 2,2...2,3°. Это значение с достаточной степенью точности совпадает с величиной ширины ДН по уровню 0,5.

Интересно отметить, что на рис. 4 заметны изображения боковых лепестков. Это искажает визуализируемую информацию. По-видимому, при программной обработке сигнала целесообразно использовать какую-либо функциональную зависимость яркости от амплитуды (например, экспоненциальную), что позволит исключить из визуализируемого изображения образ боковых лепестков.

Разрешающая способность ФАР определяется

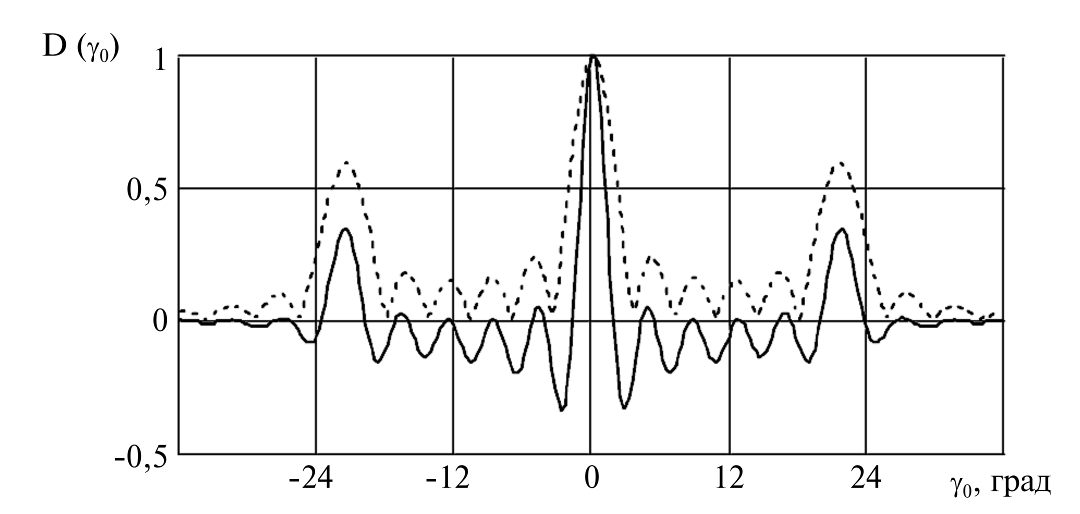



*Рис. 3. Диаграмма направленности линейной эквидистантной антенной решётки для традиционного (---) и предложенного (—) методов обработки сигналов*

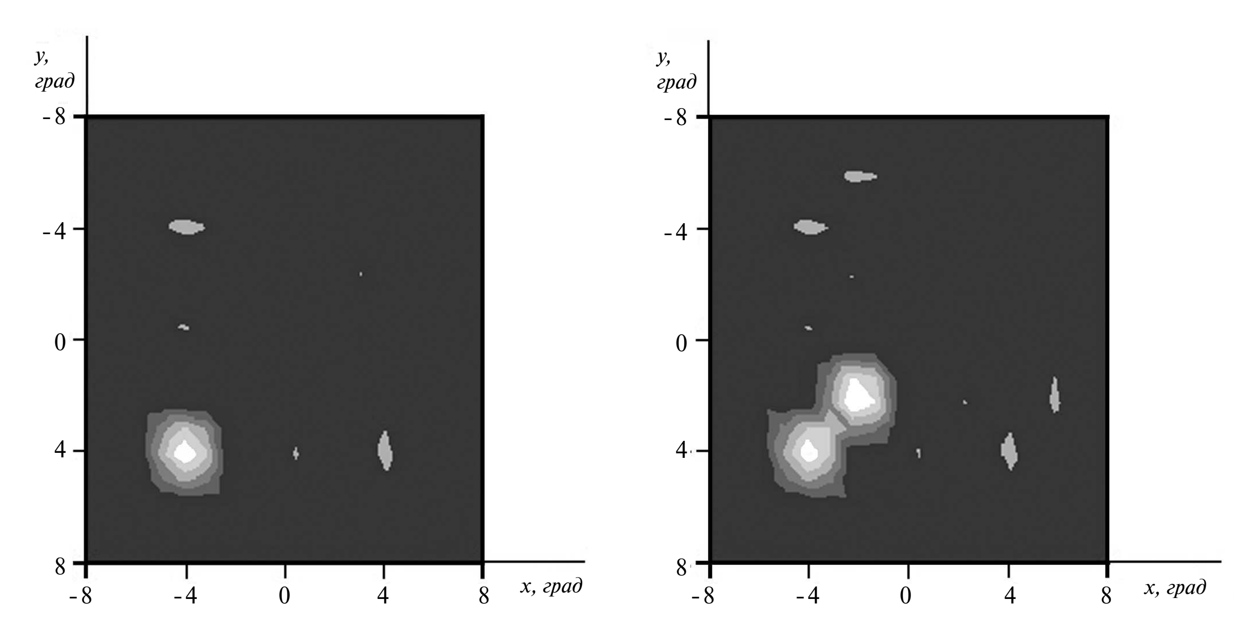



**Рис. 4.** *Визуализируемое двумерное изображение акустического поля с одним источником АЭ (слева) и с двумя источниками (справа)*

по минимальному расстоянию между двумя источниками АЭ, наблюдаемыми как раздельные. На рис. 4 справа можно видеть, что два источника наблюдаются раздельно. При уменьшении расстояния между источниками, изображения будут сливаться в одно пятно.

Сканирование ДН ФАР, как известно, сопровождается возрастанием уровня боковых лепестков. Причём уровень их тем больше, чем больший угол отклонения. Однако попадающие в зону контроля боковые лепестки не должны превышать 50 % от уровня основного лепестка. Это служит дополнительным фактором ограничения размера сектора сканирования.

## Заключение

Таким образом, устройство, реализующее предлагаемый метод обработки сигналов преобразователей ФАР и формирующее выходной сигнал в соответствии с выражением (1), обеспечивает дистанционность контроля, обработку информации в реальном масштабе времени, высокую точность определения мест утечек с высокой производительностью. Оно применимо для малых и больших утечек как на сооружаемых, так и на эксплуатируемых подводных переходах нефте- и газопроводов, безопасно для окружающей среды и обслуживающего персонала.

Тема вошла в число победителей конкурса научных разработок молодых учёных в 2002 г. и получила финансовую поддержку от Администрации Томской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 1357209 Великобритания, G01M 3/24. Testing under water pipelines for leaks / A. Roberts. Заявлено 30.10.1972; Опубл. 19.06.1974. - 2 с.
2. Патент 3992924 США, G01M 3/24. Under water pipelines / J.W. Ella, A. Roberts. Заявлено 01.12.1975; Опубл. 23.11.1976. - 5 с., 2 л. ил.
3. Патент 2163015 Россия, G01N 29/04, G01M 3/00. Способ определения положения источников сигналов акустической эмиссии и устройство для его осуществления / И.О. Болотина, Б.М. Лапшин, В.С. Макаров, А.И. Солдатов, С.А. Цехановский. Заявлено 10.04.1998; Опубл. 10.02.2001, Бюл. № 4. - 14 с.: ил.
4. Bolotina I.O. Antenna array resolving power // Modern Techniques and Technology: Trans. of VII Intern. Scien. and Pract. Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists. - Tomsk, 2000. - P. 68-70.
5. Скучик Е. Основы акустики. Т. 2, Пер. с англ. / Под ред. Л.М. Лямшева. - М.: Мир, 1976. - 542 с.
6. Болотина И.О., Макаров В.С., Цехановский С.А. Моделирование процесса сканирования и визуализации акустического поля // Современные техника и технологии, СТТ' 2002: Труды VII междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых учёных. - Томск, 2002. - Т. 1. - С. 226-228.